

УДК 621.771.014

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПРАВКИ ПОЛОС И ЛЕНТ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ СВОЙСТВА, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА<sup>1</sup>

©2024 г. А.Е. Шелест<sup>1\*</sup>, В.С. Юсупов<sup>1\*</sup>, С.О. Рогачев<sup>1\*,2\*</sup>, Д.В. Тен<sup>2\*</sup>, В.А. Андреев<sup>1\*</sup>, Р.Д. Карелин<sup>1\*,2\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ) РАН, Москва

E-mail: shelest99@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

E-mail: rdkarelin@gmail.com

Поступила в редакцию 19 сентября 2023 г.

После доработки 27 октября 2023 г. принята к публикации 10 ноября 2023 г.

Выполнены эксперименты по деформации на прецизионной роликоправильной машине ARKU 25/21 (EcoMaster®25) полос алюминиевых сплавов ВД1 и ВАК4 и технической чистой меди с точным измерением толщин и их статистическим анализом до и после обработки. На полосах из технической чистой меди с разной номинальной толщиной от 3 до 1 мм исследовалось влияние изгиба на механические свойства и особенности деформации металла. Полученные результаты необходимы для разработки рациональных режимов обработки металлических материалов на указанной роликоправильной машине.

**Ключевые слова:** упругопластическая деформация; знакопеременный изгиб; толщина полос; механические свойства; схемы деформированного состояния; коэффициент пластической анизотропии.

При обработке полос и лент из металлических материалов на роликоправильной машине с целью управления их структурой и свойствами решающим является условие неизменности геометрических размеров заготовок, получаемых после знакопеременной упругопластической деформации [1]. С целью проверки выполнения этого условия проведены специальные эксперименты, основанные на измерениях толщины полос. Практическое значение подобных исследований заключается еще и в том, что геометрия листов и лент должна отвечать требованиям их стандартизованного сортамента, учитываемым при разработке технологии последующей листовой штамповки [2]. Не менее значительный интерес представляют эксперименты по изучению влияния обработки металлических материалов с помощью роликоправильной

машины на их механические свойства при варьировании исходной толщиной полос и увеличении числа проходов.

Решению указанных задач по сохранению толщины листов и лент, а также изменению их свойств после знакопеременного упругопластического изгиба посвящена настоящая работа.

**Материалы и методика расчетов.** Основным объектом при исследовании толщин полос до и после обработки выбраны алюминиевые сплавы ВД1 и ВАК-4 с номинальной (по технической документации) толщиной 2,8 мм. Химический состав этих сплавов содержится в работе [3]. Кроме того, исследовались полосы технической чистой меди с номинальной толщиной 3, 2 и 1 мм.

При проведении экспериментов для оценки изменения толщины полос до и после обработки на роликоправильной машине использовались методы статистической обработки и анализа с определением следующих характеристик [4—7]:  $h_{cp}$  — среднее значе-

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-01176-23-00 на 2023 г.

ние толщины, мм;  $R$  — размах вариации ( $h_{\max} - h_{\min}$ ), мм;  $\sigma_{\text{cp}}$  — среднее квадратичное отклонение, мм;  $v$  — коэффициент вариации ( $(\sigma_{\text{cp}}/h_{\text{cp}})100$ ), %; границы интервала относительно значения  $h_{\text{cp}}$ , в который с вероятностью 95 % попадают возможные отклонения толщины (границы 95%-ой надежности), мм.

Следует подчеркнуть, что на прецизионной роликоправильной машине ARKU 25/21 входной и выходной зазоры между роликами устанавливаются с точностью 0,01 мм в строгой зависимости от среднего значения исходной толщины заготовки, которая должна определяться с такой же точностью (0,01 мм). Поэтому толщину полос измеряли микрометром с цифровым отсчетным устройством типа МКЦ25 [8]. Диапазон измерений указанного микрометра 0—25 мм, предел допустимой погрешности  $\pm 0,004$  мм, класс точности 1.

При установке входного зазора  $G_1$  использовалась нижняя граница номограммы, рекомендуемой изготовителями машины ARKU 25/21, аппроксимируемая функцией

$$G_1 = -3,083 + 2,602h_{\text{cp}}^{0,6646} \quad (1)$$

и обеспечивающая в таких условиях максимальную деформацию при правке. Что касается величины выходного зазора  $G_{19}$ , то он всегда принимается равным  $h_{\text{cp}}$ .

Основным инструментом при оценке эффективности упрочнения металлических полос при обработке на роликоправильной машине являлись уравнения кривых течения, которые строились по результатам испытаний на растяжение, проведенных в соответствии с ГОСТ 11701—84 и ГОСТ 1497—84 [9, 10]. Разрывные образцы имели ширину рабочей части  $b_0 = 10,0$  мм и начальную расчетную длину  $l_0 = 20,0$  мм. Испытания проводились на машине Instron со скоростью растяжения  $0,002 \text{ с}^{-1}$ . Результаты испытаний выдавались машиной в виде Excel-файлов, содержащих: осевое растягивающее усилие  $P$  (Н); условное напряжение  $\sigma_y = P/F_0$  (МПа); степень деформации  $\varepsilon = (l-l_0)100/l_0$  (%), где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца, а  $l$  — текущая расчетная длина образца. На основе этих данных машина автоматически рассчитывала значения механических свойств, включая:  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести (МПа);  $\sigma_b$  — вре-

менное сопротивление разрыву (МПа);  $\delta$  — относительное удлинение после разрыва (%);  $\delta_{\text{равн}}$  — равномерное относительное удлинение (%).

Результаты испытаний на растяжение позволяют аналитически представить кривые течения в виде зависимостей истинных напряжений  $\sigma = P/F$  ( $F$  — площадь поперечного сечения образца, уменьшающаяся в процессе растяжения) от интенсивности главных истинных деформаций  $e_i$  [11]. В работе [12] показано, что аргументом этих уравнений является интенсивность главных истинных деформаций  $e_i = \ln(1 + 0,01\varepsilon)$ , а функцией — истинное напряжение  $\sigma = \sigma_y(1 + 0,01\varepsilon)$ . Сами же кривые течения наиболее часто представляются и используются в форме уравнения Надаи [13, 14]:

$$\sigma = \sigma_0 e_i^n, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  — коэффициент упрочнения (МПа);  $n$  — показатель деформационного упрочнения.

Параметры  $\sigma_0$  и  $n$  степенной функции (2) определялись после ее линеаризации путем логарифмирования с получением уравнения  $\ln\sigma = \ln\sigma_0 + n\ln e_i$ . Далее компоненты этого уравнения  $\ln\sigma_0$  и  $n$  вычислялись с помощью метода наименьших квадратов [6], включенного в программный продукт STATISTICA. При этом следует учитывать, что кривые течения являются эффективным средством анализа и оценки сопротивления деформации при линейной схеме напряженного состояния [11].

**Результаты расчетов и их анализ.** Толщина каждой из исследуемых полос алюминиевых сплавов до обработки на машине ARKU 25/21 измерялась 50 раз. Из полученного количества данных последовательно делали выборки с числом 40, 30, 20 и 10 измерений, для которых рассчитывались статистические характеристики, представленные в табл. 1. Полученные результаты в первую очередь свидетельствуют о высокой размерной точности полос исследуемых алюминиевых сплавов по их толщине. В соответствии с классификацией [2] предельные отклонения по толщине  $\pm 0,12$  мм относятся к полосам высокой точности изготовления. Что касается числа измерений толщины полос, то было решено в будущем ограничиться тридцатью измерениями.

Таблица 1

**Статистические характеристики исходной толщины полос  
алюминиевых сплавов при разном числе измерений**

| Сплав | Число измерений | $h_{\text{ср}}, \text{ мм}$ | $R, \text{ мм}$ | $\sigma_{\text{ср}}, \text{ мм}$ | $\nu, \%$ | Границы 95%-ой надежности, мм |
|-------|-----------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------|-------------------------------|
| ВД1   | 10              | 2,83                        | 0,056           | 0,018                            | 0,62      | $\pm 0,03$                    |
|       | 20              | 2,83                        | 0,078           | 0,019                            | 0,65      | $\pm 0,04$                    |
|       | 30              | 2,82                        | 0,078           | 0,018                            | 0,64      | $\pm 0,04$                    |
|       | 40              | 2,82                        | 0,078           | 0,018                            | 0,63      | $\pm 0,04$                    |
|       | 50              | 2,82                        | 0,078           | 0,017                            | 0,60      | $\pm 0,03$                    |
| ВАК4  | 10              | 2,81                        | 0,010           | 0,003                            | 0,11      | $\pm 0,01$                    |
|       | 20              | 2,81                        | 0,014           | 0,004                            | 0,12      | $\pm 0,01$                    |
|       | 30              | 2,81                        | 0,035           | 0,006                            | 0,22      | $\pm 0,01$                    |
|       | 40              | 2,81                        | 0,038           | 0,008                            | 0,27      | $\pm 0,01$                    |
|       | 50              | 2,81                        | 0,041           | 0,007                            | 0,26      | $\pm 0,01$                    |

Таблица 2

**Статистические характеристики толщины полос алюминиевых сплавов  
до и после обработки на роликоправильной машине**

| Сплав | Состояние полосы | $G_1, \text{ мм}$ | $h_{\text{ср}}, \text{ мм}$ | $R, \text{ мм}$ | $\sigma_{\text{ср}}, \text{ мм}$ | $\nu, \%$ | Границы 95%-ой надежности, мм |
|-------|------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------|-------------------------------|
| ВД1   | До обработки     | —                 | 2,82                        | 0,078           | 0,018                            | 0,64      | $\pm 0,04$                    |
|       | После обработки  | 2,10              | 2,81                        | 0,023           | 0,006                            | 0,21      | $\pm 0,01$                    |
| ВАК4  | До обработки     | —                 | 2,81                        | 0,035           | 0,006                            | 0,21      | $\pm 0,01$                    |
|       | После обработки  | 2,09              | 2,81                        | 0,020           | 0,006                            | 0,21      | $\pm 0,01$                    |

Далее полосы из алюминиевых сплавов проходили однократную обработку на роликоправильной машине. Установку входного зазора  $G_1$  выполняли в соответствии с соотношением (1), обеспечивающим максимальную деформацию при правке. Результаты сравнения средних толщин полос алюминиевых сплавов и их статистических характеристик представлены в табл. 2.

Для выяснения возможности статистической неизменности величины средней толщины полос других металлов после их знакопеременной упругопластической деформации в соответствии с вышеописанной методикой были выбраны для исследования полосы технически чистой меди, имеющие в состоянии поставки номинальную толщину 3, 2 и 1 мм. Это обстоятельство значительно расширило границы экспериментов. Руководствуясь тем,

что входной зазор  $G_1$  равен значению, получаемому из соотношения (1), а выходной зазор  $G_{19} = h_{\text{ср}}$ , для медных полос с разными номинальными толщинами установлены следующие входной и выходной зазоры: для толщины 3 мм — 2,21 и 2,91 мм; для толщины 2 мм — 1,07 и 2,02 мм; для толщины 1 мм — -0,43 и 1,03 мм соответственно.

Статистические характеристики толщин медных полос до и после обработки на роликоправильной машине представлены в табл. 3. Приведенные сведения с привлечением материалов табл. 2 наглядно подтверждают результаты, полученные при анализе поведения средних толщин при деформации алюминиевых сплавов. Экспериментально показано, что при упругопластической знакопеременной деформации в пределах, указанных номограммой производителей роли-

Таблица 3

**Статистические характеристики толщины медных полос  
до и после обработки на роликоправильной машине**

| Номинальная<br>толщина, мм | Состояние<br>полосы | $h_{\text{ср}}$ , мм | $R$ , мм | $\sigma_{\text{ср}}$ , мм | $\nu$ , % | Границы 95% -ой<br>надежности, мм |
|----------------------------|---------------------|----------------------|----------|---------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 3                          | До обработки        | 2,91                 | 0,041    | 0,01                      | 0,34      | $\pm 0,02$                        |
|                            | После обработки     | 2,89                 | 0,029    | 0,008                     | 0,28      | $\pm 0,02$                        |
| 2                          | До обработки        | 2,02                 | 0,028    | 0,007                     | 0,35      | $\pm 0,01$                        |
|                            | После обработки     | 2,03                 | 0,048    | 0,013                     | 0,84      | $\pm 0,03$                        |
| 1                          | До обработки        | 1,03                 | 0,027    | 0,006                     | 0,58      | $\pm 0,01$                        |
|                            | После обработки     | 1,03                 | 0,022    | 0,006                     | 0,58      | $\pm 0,01$                        |

Таблица 4

**Механические свойства медных полос до и после обработки на  
роликоправильной машине**

| Номинальная<br>толщина, мм | Состояние<br>полосы | Толщина<br>образца, мм | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{\text{в}}$ | $\delta$ | $\delta_{\text{равн}}$ |
|----------------------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------------|----------|------------------------|
|                            |                     |                        | МПа            |                     | %        |                        |
| 3                          | Отжиг               | 2,91                   | 35             | 226                 | 55,6     | 37                     |
|                            | 1 проход            | 2,89                   | 156            | 232                 | 44,1     | 27                     |
| 2                          | Отжиг               | 2,05                   | 36             | 226                 | 57,7     | 28                     |
|                            | 1 проход            | 2,05                   | 160            | 232                 | 48,1     | 21                     |
| 1                          | Отжиг               | 1,05                   | 52             | 233                 | 34,0     | 18                     |
|                            | 1 проход            | 1,04                   | 154            | 239                 | 26,8     | 18                     |

коправильной машины, геометрические размеры полос и лент сохраняются. Полученные данные свидетельствуют также о том, что при обработке полос на роликоправильной машине обеспечивается сохранение их средней толщины в границах 95% -ой надежности при заметном уменьшении разброса, т.е. уменьшении разнотолщинности. Именно это обстоятельство и соответствует главной задаче указанного механизма — повышению плоскостности листового проката.

Переходя к исследованию влияния знакопеременной упругопластической деформации на свойства металлических материалов (в данном случае речь идет о технически чистой меди), следует указать, что медные полосы всех толщин до обработки на роликоправильной машине подвергали отжигу в вакууме по режиму: нагрев до 700 °С, выдержка 10 мин, медленное охлаждение в печи. Для рассмотренного выше случая обработки полос разных номинальных толщин за 1 про-

ход в результате испытаний на разрыв получены характеристики механических свойств, представленные в табл. 4. Выполнены также эксперименты по деформации медных полос номинальной толщиной 3 мм за 2, 3 и 4 прохода в роликоправильной маши-

Таблица 5

**Механические свойства медных полос номинальной  
толщиной 3 мм до и после обработки на  
роликоправильной машине**

| Состояние<br>полосы | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{\text{в}}$ | $\delta$ | $\delta_{\text{равн}}$ |
|---------------------|----------------|---------------------|----------|------------------------|
|                     | МПа            |                     | %        |                        |
| Отжиг               | 35             | 226                 | 55,6     | 37                     |
| 1 проход            | 156            | 232                 | 44,1     | 27                     |
| 2 прохода           | 171            | 234                 | 44,0     | 27                     |
| 3 прохода           | 186            | 237                 | 41,2     | 25                     |
| 4 прохода           | 182            | 237                 | 43,5     | 25                     |

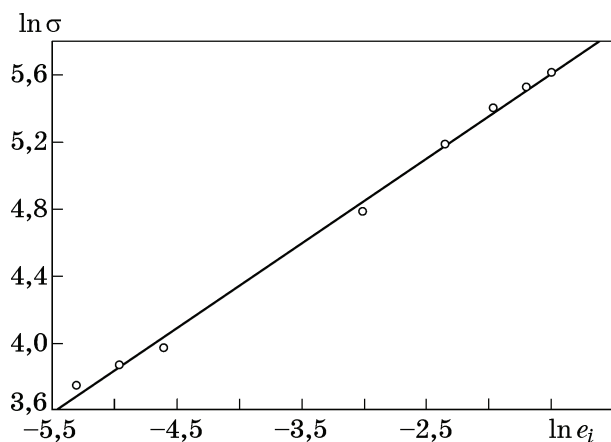
Таблица 6

Исходная информация для построения кривой течения медной полосы номинальной толщиной 3 мм в отожженном состоянии

| №<br>п.п. | $\sigma_y$ ,<br>МПа | $\varepsilon$ , % | $e_i$ | $\sigma$ ,<br>МПа | $x = \ln(e_i)$ | $y = \ln(\sigma)$ |
|-----------|---------------------|-------------------|-------|-------------------|----------------|-------------------|
| 1         | 42,1                | 0,5               | 0,005 | 42,3              | -5,298         | 3,745             |
| 2         | 47,2                | 0,75              | 0,007 | 47,6              | -4,962         | 3,862             |
| 3         | 52,3                | 1,0               | 0,01  | 52,8              | -4,605         | 3,967             |
| 4         | 113,5               | 5,0               | 0,049 | 119,2             | -3,016         | 4,781             |
| 5         | 162,1               | 10,0              | 0,095 | 178,3             | -2,354         | 5,184             |
| 6         | 192,0               | 15,0              | 0,140 | 220,8             | -1,966         | 5,397             |
| 7         | 209,5               | 20,0              | 0,182 | 251,4             | -1,704         | 5,527             |
| 8         | 219,2               | 25,0              | 0,223 | 274,0             | -1,501         | 5,613             |

не. Механические свойства этих полос до и после обработки содержатся в табл. 5.

Теперь можно приступить к определению уравнений кривых течения типа уравнения (2) для медных полос указанных выше толщин в исходном состоянии (после отжига) и после разных условий обработки на роликоправильной машине. Для начала расчет выполнен для полосы номинальной толщиной 3 мм в исходном состоянии при реальной средней толщине 2,91 мм. В табл. 6 приведена исходная информация, а на фиг. 1 — результаты построения линеаризованной кривой течения, представленной в координатах  $x = \ln e_i$  и  $y = \ln \sigma$ . Для ее описания получено уравнение  $y = 6,3722 + 0,508x$  при показателе линейной корреляции  $R = 0,9985$ , свидетельствующем о высокой степени приближения полученного уравнения фактическим результатам испытания, отмеченным на фиг. 1 точками. Окончательное представле-



Фиг. 1. Графическое представление расчетной линеаризованной кривой течения отожженной медной полосы номинальной толщиной 3 мм

ние уравнения кривой течения медной полосы с номинальной толщиной 3 мм в исходном состоянии выглядит так:

$$\sigma = 585,7 e_i^{0,508}. \quad (3)$$

До практического использования формулы (3) рассмотрим геометрические и деформационные условия при знакопеременном упругопластическом изгибе этой полосы с реальной средней толщиной 2,91 мм на роликоправильной машине EcoMaster 25/21, представленные в табл. 7. В эту таблицу включены следующие изменяющиеся по мере прохождения полосы через машину величины:  $G$  — зазор между очередной парой роликов (мм);  $R_{изг}$  — радиус изгиба средней линии полосы (мм);  $\varepsilon_{нар}$  — относительная деформация наружного волокна полосы (%);  $\delta$  — толщина центрального упругодеформируемого слоя полосы (мм);  $\Delta = (h_{cp} - \delta)/h_{cp}$  — относительная протяженность по толщине полосы зон пластической деформации. Последняя величина в табл. 7 требует отдельной расшифровки:  $e_i^{экр\Delta}$  — суммарная эквивалентная интенсивность главных истинных деформаций при плоском напряженном состоянии, задаваемая соотношением

$$e_i^{экр\Delta} = \sum_{k=1}^j 0,5(e_i^{нар})_k \Delta_k, \quad (4)$$

где  $e_i^{нар}$  — интенсивность главных истинных деформаций наружного волокна;  $j$  — номер последней операции изгиба, имеющей зоны пластической деформации в полосе, при которой выполняется неравенство  $\delta_i < h_{cp}$ , а уже на следующей операции изгиба  $\delta_i > h_{cp}$ . В

Таблица 7

**Геометрические и деформационные условия при знакопеременном упругопластическом изгибе отожженной медной полосы с номинальной толщиной 3 мм и средней толщиной  $h_{cp} = 2,91$  мм**

| Номер операции изгиба | $G$ , мм | $R_{изг}$ , мм | $\epsilon_{нар}$ , % | $\delta$ , мм | $\Delta$ | $e_i^{эkv}$ | $e_i^{эkv\Sigma}$ |
|-----------------------|----------|----------------|----------------------|---------------|----------|-------------|-------------------|
| 1                     | 2,21     | 70,18          | 2,03                 | 0,29          | 0,902    | 0,0091      | 0,0091            |
| 2                     | 2,25     | 74,28          | 1,96                 | 0,30          | 0,898    | 0,0087      | 0,0178            |
| 3                     | 2,29     | 78,91          | 1,84                 | 0,32          | 0,892    | 0,0081      | 0,0259            |
| 4                     | 2,33     | 84,25          | 1,73                 | 0,34          | 0,884    | 0,0076      | 0,0335            |
| 5                     | 2,37     | 90,14          | 1,61                 | 0,36          | 0,876    | 0,0070      | 0,0405            |
| 6                     | 2,40     | 97,05          | 1,50                 | 0,39          | 0,867    | 0,0064      | 0,0470            |
| 7                     | 2,44     | 105,12         | 1,38                 | 0,42          | 0,856    | 0,0059      | 0,0528            |
| 8                     | 2,48     | 114,65         | 1,27                 | 0,46          | 0,842    | 0,0053      | 0,0582            |
| 9                     | 2,52     | 126,10         | 1,15                 | 0,50          | 0,827    | 0,0047      | 0,0629            |
| 10                    | 2,56     | 140,09         | 1,04                 | 0,56          | 0,807    | 0,0042      | 0,0671            |
| 11                    | 2,60     | 157,48         | 0,92                 | 0,63          | 0,783    | 0,0036      | 0,0707            |
| 12                    | 2,64     | 180,07         | 0,81                 | 0,72          | 0,752    | 0,0030      | 0,0737            |
| 13                    | 2,68     | 210,06         | 0,69                 | 0,94          | 0,711    | 0,0025      | 0,0761            |
| 14                    | 2,72     | 252,05         | 0,58                 | 1,01          | 0,654    | 0,0019      | 0,0780            |
| 15                    | 2,75     | 315,04         | 0,46                 | 1,26          | 0,567    | 0,0013      | 0,0793            |
| 16                    | 2,79     | 420,03         | 0,35                 | 1,58          | 0,423    | 0,0007      | 0,0800            |
| 17                    | 2,83     | 630,02         | 0,23                 | 2,52          | 0,134    | 0,0002      | 0,0802            |
| 18                    | 2,87     | 1260,01        | 0,12                 | 5,04          | -0,732   | -0,0004     | 0,0798            |
| 19                    | 2,91     | —              | —                    | —             | —        | —           | —                 |

частности, из операций изгиба в табл. 7 номер этой операции  $j = 17$ , т.е. после 17-ой операции изгиба полоса будет испытывать только упругую деформацию [1].

Отметим, что приведен чисто формальный подход к анализу процесса упругопластического знакопеременного изгиба при правке полосы. В действительности динамика этого процесса гораздо сложнее. При проходе полосы между роликами, естественно, происходит циклическая деформация, в результате которой металл упрочняется, повышается его сопротивление деформации, т.е. с каждой операцией изгиба требуется увеличение изгибающего усилия. Кроме того, следует учитывать, что циклическую деформацию сопровождает эффект Баушингера, вызывающий разупрочнение металла [15]. Однако обычно большое число циклов деформации стабилизирует величину эффекта Баушингера, в этом случае его влияние может оказаться несущественным [16]. В конечном итоге всегда должна возникнуть ситуации, когда очередной изгиб не сможет

преодолеть приобретенное металлом сопротивление пластической деформации и процесс упрочнения прекратится. Далее покажем, как для объективного решения возникшей проблемы использовать результаты испытаний полос на растяжение до и после операции изгиба и уравнение кривой течения металла до изгиба.

Итак, для медной полосы с номинальной толщиной 3 мм получены уравнение (3) кривой течения и значения условного предела текучести в табл. 4 до ( $\sigma_{0,2} = 35$  МПа) и после ( $\sigma_{0,2} = 156$  МПа) обработки на роликоправильной машине. Аргументом уравнения кривой течения является  $e_i$  – интенсивность главных истинных деформаций при линейном напряженном состоянии. Чтобы определить эту величину ( $e_i^{расч}$ ), обеспечивающую повышение условного предела текучести до 156 МПа, необходимо, вставив значение 156 в левую часть уравнения (3), решить полученное уравнение относительно  $e_i$ . Соответствующие расчеты привели к следующему результату:  $e_i^{расч} = 0,074$ . При оценке дефор-

Таблица 8

**Уравнения кривых течения медных полос  
с номинальной толщиной 3, 2 и 1 мм после отжига  
и последующей операции однократного изгиба  
на роликоправильной машине**

| Номинальная<br>толщина<br>полосы, мм | Состояние<br>полосы | Уравнение кривой<br>течения   |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 3                                    | Отжиг               | $\sigma = 585,7e_i^{0,508}$   |
|                                      | 1 проход            | $\sigma = 315,04e_i^{0,1208}$ |
| 2                                    | Отжиг               | $\sigma = 570,9e_i^{0,496}$   |
|                                      | 1 проход            | $\sigma = 306,4e_i^{0,121}$   |
| 1                                    | Отжиг               | $\sigma = 521,3e_i^{0,4258}$  |
|                                      | 1 проход            | $\sigma = 331,4e_i^{0,144}$   |

Таблица 9

**Уравнения кривых течения для медных полос  
с номинальной толщиной 3 мм после отжига  
и последующих операций многократного изгиба  
на роликоправильной машине**

| Состояние полосы | Уравнение кривой течения      |
|------------------|-------------------------------|
| Отжиг            | $\sigma = 585,7e_i^{0,508}$   |
| 1 проход         | $\sigma = 315,04e_i^{0,1208}$ |
| 2 прохода        | $\sigma = 322,6e_i^{0,1151}$  |
| 3 прохода        | $\sigma = 319,7e_i^{0,098}$   |
| 4 прохода        | $\sigma = 320,3e_i^{0,1}$     |

мационного воздействия роликов в процессе правки используется величина  $e_i^{\text{экв}\Sigma}$  — суммарная эквивалентная интенсивность главных истинных деформаций (формула (4)). Тогда на основании свойств главных истинных деформаций [13] можно считать, что граничным признаком завершения фактического выполнения процесса упрочнения будет условное равенство  $e_i^{\text{расч}} \approx e_i^{\text{экв}\Sigma}$ . Нетрудно с использованием данных табл. 7 убедиться в том, что при  $e_i^{\text{расч}} = 0,074$  этому условному равенству соответствует 12-я операция изгиба ( $e_i^{\text{экв}\Sigma} = 0,0737$ ), после которой металл будет испытывать только упругие деформации.

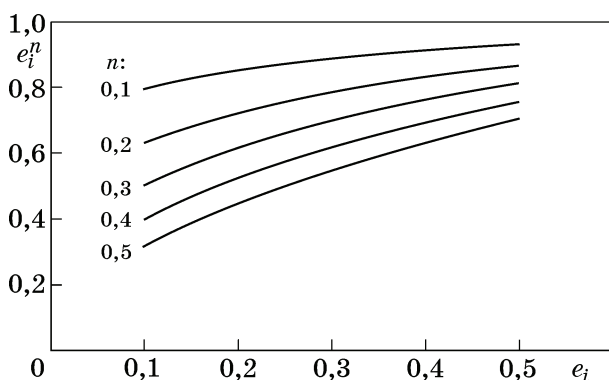
В аналогичных расчетах для медных полос с номинальной толщиной 2 и 1 мм (без публикации таблиц, подобных табл. 7) получены следующие результаты:

- для толщины 2 мм уравнение кривой течения  $\sigma = 570,9e_i^{0,496}$  (показатель линейной корреляции 0,9988), а условный предел текучести после изгиба равен 160 МПа. В результате получено значение  $e_i^{\text{расч}} = 0,077$  и определено, что требуемому равенству  $e_i^{\text{расч}} \approx e_i^{\text{экв}\Sigma}$  соответствует 17-я операция изгиба;

- для толщины 1 мм уравнение кривой течения  $\sigma = 521,3e_i^{0,4258}$  (показатель линейной корреляции 0,9951), а условный предел текучести после изгиба равен 154 МПа. В результате получено значение  $e_i^{\text{расч}} = 0,057$  и определено, что требуемому равенству  $e_i^{\text{расч}} \approx e_i^{\text{экв}\Sigma}$  соответствует 17-я операция изгиба.

Из полученных данных вытекает, что с уменьшением толщины медных полос несколько снижается уровень достижения их эффективного упрочнения при обработке на прецизионной роликоправильной машине EcoMaster 25/21. В обобщенном виде полученные уравнения кривых течения представлены в табл. 8. Следует отметить характер изменения величин коэффициента упрочнения  $\sigma_0$  и показателя деформационного упрочнения  $n$ , а именно: для всех номинальных толщин эти показатели после операции изгиба уменьшаются. Однако степень уменьшения не одинакова. Соответственно для номинальных толщин медных полос 3, 2 и 1 мм она составляет: для  $\sigma_0$  — в 1,86; 1,86; 1,57 раза, для  $n$  — в 4,41; 4,10; 2,96 раза. Выпадение данных для толщины 1 мм (уменьшение  $\sigma_0$  в 1,57 раз и  $n$  в 2,96 раза) скорее всего можно объяснить сравнительно высоким начальным значением условного предела текучести перед изгибом (52 МПа).

Аналогичные действия выполнены при расчете уравнений кривых течения и анализе механических свойств медных полос номинальной толщиной 3 мм после отжига и последующих отработок за 1, 2, 3 и 4 прохода. Полученные сведения приведены в табл. 9. Как и в рассмотренном выше случае, выявлены одинаковые по качеству события уменьшения  $\sigma_0$  и  $n$  по мере увеличения числа операций изгиба. Так,  $\sigma_0$  уменьшается в 1,86; 1,86; 1,82; 1,83 раза, а  $n$  — в 4,21; 4,41; 5,18; 5,08 раза в соответствии с числом проходов 1, 2, 3 и 4. Здесь уместно отметить своеобразие степенной функции (2), заключающееся в том, что как показатель деформационного упрочнения  $n$ , так и интенсивность главных истинных деформаций  $e_i$  (аргумент упомянутой функции) по величине строго меньше единицы. В этом случае графики зависимости  $e_i^n$  от  $e_i$  имеют вид, приведенный на фиг. 2.



Фиг. 2. Графики зависимости функции  $e_i^n$  от аргумента  $e_i$  при разных значениях показателя деформационного упрочнения  $n$

С учетом этих графиков, а также на основе анализа условий обработки медных полос изгибами на роликоправильной машине и результатов их испытаний на растяжение можно прийти к выводу, что для достижения предельного упрочнения достаточно трех операций, после которых показатель деформационного упрочнения кривых течения удовлетворяет условию  $n \leq 0,1$ , а условный предел текучести достигает максимального значения.

При рассмотрении результатов испытаний на растяжение медных полос (см. табл. 4 и 5) было выявлено, что значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  мало различаются, независимо от толщин полос и их состояния до или после обработки. Все девять значений  $\sigma_b$  прошли статистический анализ, в результате которого получены следующие характеристики распределения этого показателя: среднее значение 232,9 МПа; среднее квадратичное отклонение 4,5 МПа; размах вариации от 226 до 239 МПа; коэффициент вариации 1,93%; границы интервала относительно среднего значения  $\sigma_b$ , в который с вероятностью 95% попадут возможные отклонения значений временного сопротивления разрыву,  $\pm 8,82$  МПа.

Такие близкие значения  $\sigma_b$  можно объяснить следующим образом. В процессе испытания растяжением образцов после достижения под нагрузкой условного предела текучести на стадии равномерной деформации в условиях линейного напряженного состояния происходит упрочнение металла, которое далее при достижении предельного значения нагрузки приводит к образованию шейки и переходу к деформации в условиях объемного напряженного состояния. Вся

эта деформационно-нагрузочная система при испытании на растяжение работает по принципу самоуправления. Действительно, если полоса находится в исходном состоянии или после обработки, то характеризуется разными значениями условного предела текучести и, соответственно, у нее будут разные протяженности воздействия равномерной деформации, что видно в табл. 4 и 5. Наибольшая деформация при изгибе составляет ~2 %, и ее испытывают поверхностные волокна (см. табл. 7), а при растяжении на интервале равномерной деформации ее воздействие будет на порядок больше. В итоге временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  выравнивается и принимает мало изменяющееся значение.

При проведении испытаний на растяжение образцов медных полос с номинальной толщиной 3, 2 и 1 мм после отжига и операции изгиба проводились измерения для расчета коэффициента пластической анизотропии  $R$ , характеризующего соотношение между пластическими свойствами в плоскости прокатки и по толщине образцов, относительная деформация которых равна величине конечного равномерного относительного удлинения [9]. Необходимые для расчета  $R$  измерения делались двумя способами – по меткам и по экстензометру, результаты которых оказались полностью идентичными и составляли: для номинальной толщины 3 мм — 0,66 до и 0,68 после изгиба; для номинальной толщины 2 мм — 0,63 до и 0,68 после изгиба; для толщины 1 мм — 0,66 до и 0,61 после изгиба. Следует отметить, что полосы вырезались из листов вдоль направления их прокатки, поэтому исходные листы и полосы испытывали совпадающее внешнее воздействие инструмента при плоской схеме деформированного состояния. Именно этим подтверждается факт малых различий величин  $R$ , определяемых на полосах до и после их изгиба.

**Выводы. 1.** Статистическая обработка и анализ измерений толщины полос алюминиевых сплавов (номинальная толщина 2,8 мм) и технической чистой меди (номинальные толщины 3, 2 и 1 мм) до и после обработки на роликоправильной машине при рекомендованном минимальном входном зазоре показали, что средние значения толщины во всех случаях не изменяются, а разброс вариаций измерений сужается, что свидетельствует об уменьшении разнотолщинности полос и по-

вышении их планшетности после знакопеременной упругопластической деформации.

2. Проанализирована динамическая картина поведения полос из технически чистой меди в процессе знакопеременной упругопластической деформации во время прохождения через роликотправильную машину при монотонном снижении интенсивности главных истинных деформаций, увеличении упругодеформирующейся центральной зоны полос и уменьшении величины их упрочнения.

3. На основании указанного анализа разработан алгоритм определения суммарной эквивалентной интенсивности главных истинных деформаций с использованием уравнений кривых течения в исходном состоянии обрабатываемых металлических материалов и результатов их испытаний на растяжение, обеспечивающий эффективность знакопеременной упругопластической деформации при правке.

4. Сохранение медными полосами после знакопеременного изгиба значений равномерного относительного удлинения не менее 18% свидетельствует о возможности их последующей обработки операциями листовой штамповки.

5. Показано, что прокатка листов и операции знакопеременного упругопластического изгиба на роликотправильной машине реализуются в условиях плоской схемы деформированного состояния, о чем свидетельствуют слабо различающиеся значения соответствующих коэффициентов пластической анизотропии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелест, А.Е. Изучение дополнительной возможности воздействия упругопластической знакопеременной деформации на свойства металлических материалов при их обработке на роликотправильной машине / А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, С.О.Рогачев, В.А.Андреев, Р.Д.Карелин, М.М.Перкас // Металлы. 2023. № 1. С. 75—83.
2. ГОСТ 19904—90. Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент. — Справ. Система «Техэксперт». 2012.

3. ГОСТ 1131—76. Сплавы алюминиевые деформируемые в чушках. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов. 2001.
4. Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский; 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1971. 576 с.
5. Боровков, А.А. Теория вероятностей: учеб. пособие для вузов / А.А. Боровков; 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 432 с.
6. Кибзун, А.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами / А.И. Кибзун, Е.Р.Горяинова, А.В.Наумов, А.Н.Сиротин. — М.: Физматлит, 2002. 224 с.
7. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов / Н.Ш. Кремер; 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
8. ГОСТ 6507—90. Микрометры. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов. 2004.
9. ГОСТ 11701—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. — М.: Изд-во стандартов. 1991. 20с.
10. ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Стандартиформ. 2005.
11. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов; 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1978. 369 с.
12. Смирнов-Аляев, Г.А. Соппротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев; 3-е изд., перераб. т доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1978. 368 с.
13. Шелест, А.Е. Уточнение модели знакопеременного упругопластического изгиба при деформации листового материала на роликотправильной машине / А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, С.О.Рогачев, В.А.Андреев, М.М.Перкас // Металлы. 2022. №6. С. 79—84. — (А.Е. Shelest, V.S. Yusupov, S.O. Rogachev, V.A. Andreev, M.M. Perkas, «Refinement of the Model of Alternating Elastoplastic Bending for the Deformation of a Sheet Material on a Roll Leveling Machine». Russian Metallurgy (Metally). 2022. №11. P.1408—1413.)
14. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла / А.Ю. Аверкиев. — М.: Машиностроение. — 1985. 174 с.
15. Han, K. Effect of strain and strain rate on the Bauschinger effect response of three different steels / Han K., Van Tyne C.J. // Metallurg. Mater. Trans. A. 2005. V. 36. P. 2379—2384.
16. Адигамов, Р.Р. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации / Р.Р. Адигамов, В.А. Андреев, С.О. Рогачев, Е.С. Федотов, Г.Е. Хадеев, В.С. Юсупов // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2022. Т. 65. №7. С. 455—466.